

## 宇宙のはじまり

京都大学教授 佐藤 文隆

### 一、星の宇宙と量子宇宙のあいだ

最近では宇宙論ブームであるといわれています。車椅子の天才といわれるケンブリッジ大学のホーキング博士に対する興味など重なって、このブームは盛り上がりつつあるようです。昨年夏に東京に彼がきたときは大変な熱狂ぶりでした。今から6年前に私が招待して彼は京都に2週間近く滞在しましたがマスコミは全然興味を示しませんでした。彼は今年も6月に国際会議に出席するため京都にやってきました。

昨年来、量子宇宙とか、ベビーユニバースとか、虚数の時間とか、聞きなれない言葉が宇宙の話題に登場しました。しかし、これらの話題と皆さんが宇宙という言葉で想い描くものとの間を正しく見極めないとんだ錯覚をもってしまうことになります。誰でも宇宙と聞けば星が輝く広大な空間を想い浮かべるでしょう。この宇宙のどこかに量子宇宙とか、虚数時間の世界とかの得体の知れないミステリアスなものがあるのだ、といった印象を持つとしたら、大変健全でない宇宙のイメージをかえって持つてしまうことになります。

星の宇宙の話がなぜいつの間にかさまざまなきわどい概念の話に変わっていくのか？今日の話はこういった両者の関係について説明したいと思います。

### 二、星の宇宙は永遠でない

星というのは膨大なエネルギーを放出しているのがその特徴です。このエネルギーは何によってつくられているのでしょうか。最近われわれは地球の有限さをいろいろな場面で見感しています。どこかでこうこうと電気を無駄づかいされておれば「ああこれだけだけ恐ろしい放射能が貯ったのだらう」などと考えてしまいます。ですから太陽のように惜しみもなくエネルギーのたれ流しをやっておれば「あんなことは何時までももたない」ということは実感としてわかります。

太陽はどれだけの間輝いておれるのでしょうか？この問いに答えるにはもちろんエネルギー生成のメカニズムが分からねばなりません。この問いに答えられる様になったのは一九三〇年代の終り頃です。メカニズムは熱核融合反応で太陽では約一〇〇億年もつことが分かりました。それは原子力のエネルギーなのです。太陽の内部は放射能が満ちた核融合の反応炉なのです。

星の輝く夜空を見ていると大変ロマンチックな気分になります。が、じつは放射能で暖められた天体を見ているのです。実際に当時こういう星のエネルギーや進化を研究していた物理学者がその後、アメリカでもソ連でも、第二次大戦のさなかに原子爆弾の製造に貢献するのです。星の研究などというと人畜無害のようですが全くそうではないのです。

星にはさまざまな重さの星がありますが重いものは激しく輝いて短命であり、軽い星はちびちび輝いて長生きします。しかし何れにしろ、エネルギー源は有限なのです。星が輝いている現在のような宇宙の姿はけっして永遠には続かないわけです。エネ

ルギー生成のカスもどんどん貯りつつあります。

この燃えカスというのはじつはさまざまな元素のことなのです。現在われわれは水素から始まって、炭素、酸素、鉄とかの元素をへてウラニウムのような重い元素にいたるまで九十数種類の元素があることを知っています。われわれの世界のブライエターはこの元素が織りなす多様性なのです。星はエネルギーの生成所であるのみならず元素の製造所でもあるのです。われわれをつくっている元素は全てどこかの星の中でつくられて、それが爆発によって中からかき出されたもののなのです。

さてここでわれわれは重大なことに気づかなければなりません。それは永遠には継続しない星の宇宙がまだ存在するということは、星の宇宙が始まってからたいてい時間が経っていないのだということです。すなわち星の宇宙の前はなんであつたのかという新しい問題に行き着くということです。これは必然的なことであつて、決して現在のような宇宙の姿がずーっと在ったわけではないのです。この簡単な事実にもまず気づかねばなりません。

### 三、火の玉宇宙の発見

現在、われわれは星の宇宙の前は火の玉宇宙であつたことを知っています。そしてこのことは次の2つの発見によって実証されているのです。

#### (イ) 銀河後退の発見 一九二九年

#### (ロ) 宇宙黒体放射の発見 一九六五年

一九二九年の発見は銀河系の間の距離が時間とともに大きくなりつつあるというもので、これは空間が大きくなっていることです。この結果どの銀河から見ても周囲の銀河はそこまでの距離に

比例する速度で後退しているのです。一方、一九六五年の発見は天空のどの方向からも一定の強度のマイクロ波がやってくるということです。これはテレビの大陸間中継テスト用のアンテナを用いて偶然に発見されたものでした。

宇宙の空間が膨張してること、宇宙黒体放射の存在は一緒になって、宇宙の過去が高温で高密度の様なガス体であつたということを実証しているのです。このことを理解するにはまず光の伝わる速さとは有限であるということを経験しておくかねばなりません。太陽の今の姿は約八分前の姿です。アンドロメダ大星雲の姿は実は今から百万年前の姿です。この会場でも後ろの列の人の顔は前の人の顔よりも少し過去の姿なわけです。確かにその差は無視できませんが宇宙の場合にはこうした距離による時刻の差は膨大なものになるわけです。

ある瞬間にわれわれの目に入る空の姿には十年前のものも、百万年前のものも、百億年前のものもあるのです。それらが一緒にわれわれに見えているわけです。だんだん遠くの銀河をみていくということはだんだん過去をみていくということです。遠くの場所の現在の姿は見えないのです。アンドロメダの現在の姿を見なければ百万年待たねばなりません。

一方、過去の宇宙は小さかつたということです。膨張してますます小さかれば空間が小さく高密度であつたということです。だんだん遠くを見ていけばそういう時代の宇宙が見えてくるはずなのです。宇宙黒体放射は実はそうした遠方(過去)の物質が放射したものののです。それによればその当時はまだいっさいの天体は存在しておらず、一様な密度であり、かつ火の玉のように高温なガスでした。観測の結果そういうことが分かつたのです。

#### 四、暗黒物質

現在の宇宙の物質はこうした高温の物質が冷えた残骸であり、それらが集まって天体が作られたのだと考えられています。われわれは物質といえば原子から出来ているといえます。しかしこれらの原子物質はかならずしも宇宙の主な構成要素ではないようです。主な物質は暗黒物質らしいのです。

渦巻銀河では重力と遠心力が釣りあって回転しています。したがって回転の速度を測ることによってそこでの重力をつくる物質の重さを推定できます。他方銀河の明るさから星をつくっている物質の総量が出せます。そして両者をくらべると何時も重力源の質量がおおきいのです。このことは星をつくっている原子物質以外に大量の光っていない暗黒の物質が存在しているということです。一方、火の玉が冷えて現在の宇宙の物質になったという観点からすると、このような暗黒物質は当然存在してよいということになるのです。

原子物質の特徴は電荷をもった素粒子から原子が出来ているということです。しかし素粒子にはニュートリノのように電荷を持たないものもあり、これは弱い力でしか作用しません。その作用はエネルギーが低いとどんどん小さくなるのです。したがって宇宙初期の高温の状態では他の物質と作用していたが膨張して冷えてくるに連れて作用はしなくなるのです。素粒子はその粒子と反粒子の反応で温度が低くなると消滅するのですが、作用が弱いために消えることも出来ずに残ってしまうのです。

この様に天文観測で見つかっている暗黒物質の証拠は火の玉宇宙のシナリオが描く残存粒子の予言とうまく符号しているのです。

暗黒物質の本体が何であるかはまだよく分かっていませんが、銀河宇宙の重力源がわれわれに未知の物質によるものであり、われわれの身体や地球をもたえずそういう物質が貫通しているのだという光景が描き出されてくるのです。こうなると天体形成論は新しい物質の探求をもその課題としているといえるのです。

#### 五、真空宇宙から火の玉宇宙へ

宇宙がどうして熱い物質で満たされた状態、すなわち火の玉になったか？ という問題を考えるには現代の素粒子論が描く物質像をまず学ばねばなりません。われわれが日常的にもっている物質像をそのままにしてこれを考えてもとんだ錯覚をするだけです。宇宙論の問題は目に見えないものを扱う物理学の問題などと違って日常感覚で理解できると思って皆さんが親しみを感ずるようではそれは錯覚です。月や惑星の上での状態を問題にしているときには確かにわれわれの日常感覚の発想は有効です。しかしビッグバンなどの宇宙論を考えるときには現在の素粒子論がきずきあげてきた物質像を学んでそれに立ち向かわなければ全くトンチンカンな錯覚をすることになります。最近の日本での宇宙論ブームの中で大量に出た解説にはこういうものが多いのは残念です。

現在の物質像の基礎はそれと対になる「真空」概念と一緒に語らなければなりません。現代の物質像を記述する理論は場の量子論ですが、そこでいうところの真空というものはけっして「何もない」ことではありません。そうではなく真空という媒質が運動してないあるいはエネルギーの最低の状態にあるという意味です。何か真空という実体が「ある」のです。そしてこの媒質が激しく運動しているという状態を物質があるということです。ここで注意し

て頂きたいのは物の「ある」「なし」がいつの間にか出来事が起こっている」「起こっていない」にすり替わっていることです。「ある、なし」で見るならこの真空という媒質はずっとあり続けるわけです。

火の玉が出来るということは媒質が真空の状態から激しく運動する状態にかわるということです。しかしこれをわれわれは物質が創られたと表現するのです。何も無いところから物質がどうして創られるのだろうか？ という疑問に対する説明をこの様な一種のすり替えによって行うのが現代の素粒子論なのです。そしてそのすり替えが首尾一貫した有効な考え方なのでそれが強力な方法になっているわけです。

さて火の玉の生成は真空宇宙から出発して説明することになります。変動しない真空という媒質が敷き詰められている状態からそれが急に変動し出すのはどうしてか？ という問題の立て方になります。これに対する現在もっとも有力な説明法はインフレーション理論です。これは真空にもいろいろなものがあるとしてエネルギーの高い不安定の真空（偽真空）からエネルギーの低い安定な真空に真空の状態が変化するという考え方です。この間、宇宙膨張は指数関数的に急速に膨張するのでインフレーションという名前では呼ばれているのです。何れにせよ、真空が別のものになることで余ったエネルギーが生じます。このエネルギーで媒質は激しく変動することになるのです。この間での空間の膨張は膨大で、空間は一気にミクロの存在からマクロの巨大宇宙に転化するのです。

## 六、量子宇宙

現在の宇宙の三大要素といえは天体、物質、空間です。空間というのは何時でもあるのであって、そこで物質が天体をつくったりするドラマの展開こそが宇宙の進化だという人がおるかも知れません。そういう宇宙創成論で満足なら何も話をビッグバンとか火の玉宇宙とかまで拡張する必要はなかったのです。それはすべて私の分類でいうと星の宇宙の話です。「星」というのは象徴的にいったのであって天体一般を指しています。

われわれの話は天体どころかもうすでに物質の無い真空宇宙にまでさかのぼってきているのです。残るは空間だけです。しかし空間をつくるとはどういうことでしょうか？ まず何かを「つくればなりません。」「ない」状態も想像できないでは作るなどという話が出来ないうか？ 状態も想像できないでは作るなどという状態なのではしょうか？ 空間創成論で難しいのは「つくる」ことよりは「ない」状態の意味の方なのです。

アインシュタインの一般相対論では空間というものとは不動のものではありません。空間自体のダイナミクスというものがあるのです。変化すると空間のどんな性質が変化するか？ 空間にはもともと変化してもよいような性質があったのかというところが問題になります。「空間の性質」とやぶかばうに言われてもわれわれは困ってしまいますが、三次元であること、宇宙的に大きいこと、曲率が小さいこと、などがまずは想い浮かびます。

「空間の大きさ」というのは直観的には分かりにくい概念です。それはわれわれが「何かの大きさ」ということを空間の中でしか

考えたことがないわけで、空間の大きさを云々するには空間を入れる別の空間が要するような錯覚にとらわれます。空間の大きさとというのはある方向に進んで行ったときに元に戻るということです。あるいは全体積が有限と言ってもよいでしょう。

さて宇宙が膨張してと言うのはこの様に空間の全体積が大きくなっていることです。不動の空間の中で物質のある部分の体積が増大してのではないのです。星の爆発のようなものではないのです。この点は特にビッグバンのイラストレーションを爆発のように描いたものが多いので誤った観念、イメージを与えています。なかには「大音響とともに」ビッグバンで宇宙は始まったなどと言うものもあります。これなどは言葉から夢想したポエムに過ぎません。

先の「真空」といい、「ビッグバン」といい、国語辞典の意味とは全然違う内容を指すのに自然言語を用いていることからくる錯覚は大いにあるわけです。しかし数学者や理論物理学者も含めてわれわれはそういう曖昧で、誤解を生じさせる可能性があるのにどうしても自然言語を用いて思考をする事しかできないのです。これは、宇宙論や物理学とは離れますが、人間の思考とはなんであるかを考える上で大変興味ある問題です。それほどかようにわれわれは言葉には注意しなければなりません。

さて膨張していますからともと空間は小さいものでした。これはどこまで小さかったのでしょうか。どうもこういう問題が空間の創成、ひいては宇宙の創成に迫る核心のようです。ところでこの「どんなかさかのぼる」という場合には時間と言うものが存在しているということが前提になっています。しかしこれには注意しなければなりません。空間のできる話を時間の中での注意

味があるのでしょうか？ 物質もない空間もない状態でも時間があるのでしょうか。ここで相対論の重要な発見は時間と空間が別物ではないということの発見であった事を思い出す必要があります。ですからわれわれは時間空間、あわせて時空といいますが、そういう何物かの創成を問題にしているのです。

一般相対論は時空のダイナミクスですが、これは古典論であって量子論ではありません。現代物理学が到達した物質界に対する像は量子論が基本であって、ある特殊な状態においては古典論が近似的に正しいというものです。これは初めは原子の内部構造の理解や光と物質の作用を通じて見いだされたものですが、現在でも素粒子の世界においても完全に成り立っていることが分かっています。古典論はダイナミクスの作用（エネルギー×時間）が小さい場合に正しいのです。空間のダイナミクスにおいても空間が十分小さくなれば古典論は正しくなく問題を量子論的に扱わねばならなくなるのです。これが量子宇宙です。

量子論による対象の記述と言うのはわれわれの日常的なものとらえ方と根本的に違っています。それはわれわれ人類は自然界と古典論的な作用の中で対応しているのですから当然のことです。もし量子論的振舞いの知的存在が可能なら彼らの外界の把握パターンは全く違うでしょう。

量子論的な記述とは一言でいうと相関が漠然となるということです。相関とはAという量がaという値の時Bはどんな値になるかといった対応関係です。aならBはbという値をとるという様に確定的な相関があるのが古典論です。ですからAの値を見なくてもbであったらaであるという予測ができるのです。Aを時間とすればBの時間発展が正確に予測できるという意味です。

ところが量子論ではこの相関がぼけてくるのです。aであってもBはbとは確定せず色々の値の可能性があるというわけですね。いろいろな値をとる状態が重なりあっているのです。重なっているものを決して仕分けできない意味で重なっているのです。この結果として不確定関係とか干渉効果などがあるのです。また古典的には許されない様な運動も量子論では可能になります。これをトンネル効果とよんでいます。

左右には運動可能な領域があるが間に壁があって行き来出来ない。もちろん十分なエネルギーがあればぶち抜いていけるがエネルギーも十分でない。それなのに左右に壁を通過する運動が量子論的には可能なのです。このトンネル通過のように壁を通過するときに経過する時間が虚数の時間です。この様なトンネル効果は現在のトランジスターを初めとする技術の基本です。時空のダイナミクスで古典的運動可能領域が時空があるという状態です。そこになかったものがトンネル効果が何処からそこにしみだしてくるならそれをわれわれは時空ができたと表現するのです。

トンネル効果は量子論の効果ですからもちろん常にあるのですが古典的な状態においてはその確率が極端に小さいので無視してよいということです。『起こるか？ 起こらないか？』といわれれば『起こる』であつてもそれが宇宙の年齢の一兆倍の一兆倍かかっても起こらないことを『起こる』と言うのも大人げない話です。われわれはこの様に何時もある近似のもとに物事を記述しているのです。杓子定規にやっているわけはありません。宇宙膨張も空間がある程度大きい状態では発展は殆ど古典的なのです。

そして空間の大きさや物質の状態はきちんと相関した状態にあります。この様に相関がはっきりしている状態では時間という概念を導入するのが有効なわけです。時間と言うのは『ある、なし』ではなくそのような記述の仕方が有効性を持つが故にわれわれはそれを用いているのです。

こう考えると時空の生成という問題はわれわれが時空というものをどんなように規定するかによって決ってくるのがわかります。3次元で、ある場所と他の場所の違いが意味をもち、ある点のそばにも必ず点がある、そう言った記述が大体において正しいような状態になることです。それは時空の振舞いが古典的になった時をいうのです。

例えば生命の誕生を語るときには生命の概念が要ります。分子の織りなす物理化学的な過程としては同じなのですが、その内の特殊な状態をわれわれは生命と呼んでいるのです。それと同じで時空が大ざっぱに見たときには古典的な時空のように振舞っているならそのような状態では時空があるというのです。量子的な時空の振舞いは現在のこの空間でもあるのです。量子論的にみた空間はベビーユニバースがびっちりについて穴ぼこだらけなわけですが、われわれはそんな構造は無視するわけです。何かものが替わるのではなく、問題に応じてわれわれは見方を替えているのです。

宇宙の生成という問題はこの様にあるものごとを捉えるときのわれわれの方法についてもいろいろなことを教えているのです。